

氏名	安 藤 雅 信		
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)		
学 位 記 番 号	第 4031 号		
学位授与年月日	平成13年12月27日		
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当者		
学 位 論 文 名	Spectroscopic studies of electric-field effects on miniband states in semiconductor superlattices (半導体超格子のミニバンド状態に対する電場効果の分光学的研究)		
論文審査委員	主 査 教 授	中山 正昭	副主査 教 授 中山 弘
	副主査 教 授	細田 誠	

### 論 文 内 容 の 要 旨

半導体超格子とは、異なる種類の半導体のナノメータ・スケール超薄膜を周期的に積層した人工結晶であり、量子効果によってエネルギー構造の制御が可能なることから、新たな光エレクトロニクスデバイスへの応用が期待されている。デバイス応用の観点において、超格子特有のミニバンド状態に対する電場効果は重要な要因であり、様々な電気光学的応答を示すことが知られているが、その詳細については不明な点が多く残されている。本論文は、III-V族化合物半導体 (GaAs, AlAs, AlGaAs) により構成された超格子構造を対象として、電場によるミニバンド波動関数の局在化過程、局在化状態間の共鳴、及び、キャリア輸送特性に対する共鳴効果に関する分光学的研究の成果をまとめたものである。

第1章では、本研究の背景、目的、及び、半導体超格子のミニバンド状態に対する電場効果の概要について述べた。

第2章では、GaAs/AlGaAs超格子のミニバンド状態から電場印加によるシュタルク局在状態への移行過程について述べた。電場変調スペクトルに現れるフランツ・ケルディッシュ (FK) 振動を測定し、その振動パターンを解析することにより、電子・正孔換算有効質量が電場強度が高くなるにしたがって重くなるという結果を得た。有効質量近似に基づくエネルギー固有状態の計算結果から、FK振動より求めた電子・正孔換算有効質量の電場強度依存性が、超格子中の波動関数の局在性を反映するものであることを示した。

第3章では、波動関数の局在性が強いGaAs/AlAs超格子、及び、局在性が弱いGaAs/AlGaAs超格子を対象として、電場によるミニバンド状態間の相互作用について述べた。電場変調反射スペクトルの電場強度依存性を詳細に測定した実験結果を、多重ミニバンド構造を考慮したエネルギー固有状態の計算結果に基づいて解析した。その結果、電場強度に依存する電場変調反射スペクトルの分裂と強度変化が、超格子中に多様に存在する空間的に隔てられたシュタルク局在状態間の波動関数共鳴結合に起因することを見いだした。

第4章では、GaAs/AlAs超格子中の電子輸送特性に対するX電子ミニバンド状態の影響について述べた。GaAs/AlAs超格子では、 $\Gamma$ 電子とX電子に対して、GaAs層とAlAs層がそれぞれの量子井戸層となり、超格子の層厚に依存して、GaAs- $\Gamma$ 電子状態が最低エネルギーになるタイプ-Iバンド構造、及び、AlAs-X電子状態が最低エネルギーになるタイプ-IIバンド構造が形成される。タイプ-Iとタイプ-II超格子の双方における発光スペクトルと光電流の電場強度依存性に関する実験結果を、 $\Gamma$ 電子とX電子のシュタルク局在状態エネルギーの計算結果に基づいて解析した。その結果、GaAs/AlAs超格子の電子輸送過程が、X電子シュタルク局在状態が関与するミニバンド間共鳴現象によって著しい変調を受けることを見いだした。

最後に、第5章では、結論として以上の研究成果をまとめた。

## 論文審査の結果の要旨

半導体超格子（ナノメータ・スケール半導体超薄膜の周期積層構造）は、量子効果によってエネルギー構造の制御が可能なることから、新たな光機能性デバイスへの応用が期待されている。デバイス応用において、超格子特有のミニバンド状態に対する電場効果は重要な要因であり、多様な電気光学的応答を示すことが知られているが、その詳細については不明な点が多く残されている。本論文は、Ⅲ-V族化合物半導体（GaAs、AlAs、AlGaAs）により構成された超格子を対象として、電場によるミニバンド波動関数の局在化過程、局在化状態間の共鳴、及び、キャリア輸送特性に対するミニバンド共鳴効果に関する分光学的研究の成果をまとめたものである。

まず、GaAs/AlGaAs超格子のミニバンド状態から電場印加によるシュタルク局在状態への移行過程について、電場変調反射スペクトルに現れるフランク・ケルディッシュ（FK）振動を解析することにより、電子・正孔換算有効質量が電場強度が高くなるにしたがって重くなることを見出している。また、有効質量近似に基づくエネルギー固有状態の計算結果から、FK振動より求めた電子・正孔換算有効質量の電場強度依存性が、超格子中の波動関数の局在性を反映するものであることを明らかにしている。

次に、波動関数の局在性が強いGaAs/AlAs超格子、及び、局在性が弱いGaAs/AlGaAs超格子を対象として、電場変調反射スペクトルの電場強度依存性を詳細に測定した実験結果を、多重ミニバンド構造を考慮したエネルギー固有状態の計算結果に基づいて解析し、電場強度に依存する電場変調反射スペクトルの分裂と強度変化が、空間的に隔てられたシュタルク局在状態間の波動関数共鳴によって引き起こされることを明らかにしている。

さらに、GaAs/AlAs超格子の電子輸送特性に対するX電子ミニバンド状態の影響について検討している。GaAs/AlAs超格子では、層厚に応じて、GaAs- $\Gamma$ 電子状態が最低エネルギーとなるタイプ-Iバンド構造、及び、AlAs-X電子状態が最低エネルギーとなるタイプ-IIバンド構造が形成される。タイプ-Iとタイプ-II超格子の双方における発光スペクトルと光電流の電場強度依存性に関する実験結果を、 $\Gamma$ 電子とX電子のシュタルク局在状態エネルギーの有効質量近似計算結果に基づいて解析し、X電子シュタルク局在状態が関与するミニバンド間共鳴によって、電子輸送過程が大きく変調されることを明らかにしている。

以上のように、本論文は、半導体超格子のミニバンド状態に対する電場効果に関して、新たな分光学的知見を提示している。その成果は、半導体超格子をベースとした光機能性デバイスの開発指針を示すものであり、光物性工学ならびに光エレクトロニクスに寄与するところが大きい。よって、本論文の著者は、博士（工学）の学位を受ける資格を有するものと認める。